

액막류의 MHF 점에 관한 실험적 연구

김 영 찬*

Experimental Study on Minimum Heat Flux Point of Liquid Film Flow

Yeung-Chan Kim *

Key Words: Minimum heat flux (최소열유속), Film boiling (막비등), Liquid film flow (액막류), Heat transfer (열전달), Heat treatment (열처리).

Abstract

The minimum heat flux conditions are experimentally investigated for the subcooled liquid film flow on the horizontal plate. The experimental results show that the minimum heat flux point temperature becomes higher with the increase of the velocity and the subcooling of the liquid film flow. However, the effect of distance from the leading edge of the heat transfer plate on the minimum heat flux is almost negligible. Also, the experimental results show that the propagation velocity of wetting front increase with increasing the velocity and the subcooling of the liquid film flow.

기호설명

- a : 유로의 단면적 [m²]
- D^* : 등가직경, $4a/P$ [m]
- k : 열전도계수 [W/mK]
- l_f : 액막류의 두께 [mm]
- q_w : 표면 열유속 [W/m²]
- Re : Reynolds 수, UD^*/ν
- T_i : 액체의 온도 [K]
- T_{MHF} : MHF점 온도 [K]
- T_{sat} : 액체의 포화온도 [K]
- T_w : 전열면의 표면온도 [K]
- ΔT_{MHF} : MHF점 과열온도, $T_{MHF} - T_{sat}$
- ΔT_{sat} : 전열면의 표면온도, $T_w - T_{sat}$
- ΔT_{sub} : 액체의 과냉도, $T_{sat} - T_i$
- U : 액막류의 평균속도 [m/s]

- U_w : 증기막 붕괴의 전파속도 [mm/s]
- x : 전열면 선단에서부터의 거리 [mm]

1. 서론

최소열유속(minimum heat flux)점은 N자형으로 나타나는 비등곡선에 있어서 천이비등영역과 막비등영역의 경계에 존재하는 열유속이 최소로 되는 점을 의미한다. 즉 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 비등열전달 특성은 ①대류영역, ②핵비등영역, ③천이비등영역, ④막비등영역으로 나누어 나타낼 수 있으며, 핵비등영역과 천이비등영역의 경계에 한계열유속(critical heat flux)점, 그리고 천이영역과 막비등영역의 경계에 최소열유속점이 각각 존재하는 것으로 알려져 있다. 특히 MHF점 온도는 막비등영역에서 고체-액체사이에 안정적으로 형성되는 증기막의 붕괴가 시작되는 경계온도이며, 액체의 상태와 실험조건에 따라 re-wetting 은

* 안동대학교 기계공학부

도, Leidenfrost 온도 등 다양한 명칭을 지니고 있는 것으로 알려져 있다. 이와 같이 다양한 명칭을 가지고 있는 MHF점은 주로 금속재료의 열처리, 경수로의 긴급냉각장치 등과 같은 공업분야에 있어서 매우 중요한 의미를 지니고 있는 것으로 알려져 있으며 현재까지 이와 관련된 많은 연구가 이루어져 왔다.

Berenson^{(1), (2)}, Spiegler et al.⁽³⁾, Segev et al.⁽⁴⁾ 등은 MHF점에 대한 기초연구를 수행하여 이론적 모델을 제시하였고, Baumeister et al.⁽⁵⁾은 단일액체를 대상으로 한 이론적 연구를 수행하여 표면온도, 표면상태 등이 Leidenfrost 온도에 미치는 영향을 검토하였다. 또한 Bergles et al.⁽⁶⁾는 관내를 유동하는 액체에 대해 re-wetting 온도를 실험적으로 검토하였으며, Nishio et al.^{(7), (8)}은 포화상태 및 과냉상태의 액체에 대한 풀비등 실험을 수행하여 MHF점의 예측법에 관한 견해를 보고하였다.

이러한 일련의 연구들에 의하여 MHF점은 주로 고체-액체의 접촉형태, 또는 이들 사이에 형성되는 증기막의 붕괴양상에 매우 큰 영향을 받는 것으로 알려졌으며, 이외에도 전열면 표면의 온도, 조도 등과 같은 표면상태와 액체의 온도, 속도 등이 MHF점에 큰 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다. 그러나 MHF점은 상술한 바와 같이 고체-액체의 접촉형태와 매우 밀접한 관계가 있으며, 수많은 요소가 MHF점에 영향을 미치기 때문에 현재까지도 그 실체가 명확히 밝혀지지 않고 있는 상황이다. 특히 분류냉각(laminar cooling)을 이용한 강재의 가공열처리에서는 MHF점 온도가 약 200℃에서 700℃에 이르는 넓은 범위에서 나타나고 있으며 현재까지도 이러한 현상을 명확히 설명할 수 있는 연구결과는 아직도 보고되지 않고 있다. 또한 액체가 포화상태인 풀비등을 대상으로 한 MHF점에 관한 연구결과는 비교적 많은 것에 비해, 액체가 과냉상태이고 수평의 전열면위를 일정한 속도로 유동하는 경우에 있어서 MHF점을 검토한 연구결과는 매우 드물게 보고되고 있는 상황이다.

본 연구에서는 이러한 연구배경을 기초로 하여 주로 금속재료의 열처리를 염두에 둔 강재대류막비등 열전달실험을 수행하였으며, 본고에서는 주로 액막류의 온도, 속도, 전열면의 위치 등이 MHF점에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

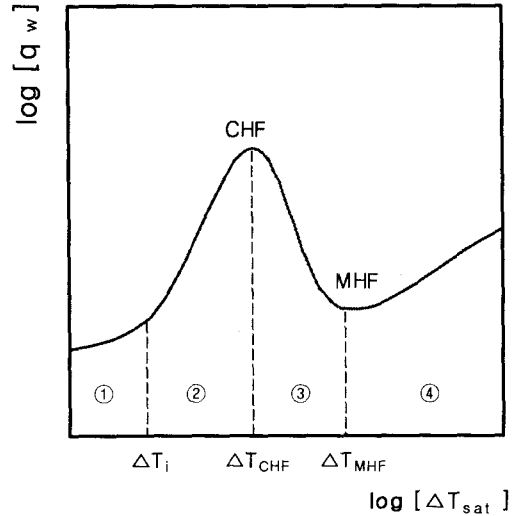


Fig. 1 Boiling curve

2. 실험장치 및 방법

본 실험에서는 전열면을 적외선 가열장치를 이용하여 약 900℃까지 가열한 후, 두께가 5 mm 정도의 액막류를 전열면상에 흐르게 함으로서 전열면을 냉각시키는 비정상실험을 수행하였다. 실험장치는 기존의 연구^{(9), (10)}에서와 거의 동일한 장치를 사용하였으며, 참고문헌[11]에 전열면의 구조, 표면온도 및 열유속의 측정방법, 측정값의 오차추정 등에 대해 자세히 나타내었다. 본고에서는 실험장치 및 방법에 대해서만 간략히 설명하기로 한다. Fig. 2에 본 연구에서 사용한 전열면의 개략도를 나타내었다. 전열면은 길이, 폭, 두께가 각각 110, 70, 20 mm이며 스테인레스강(SUS304)으로 제작하였다. 또한 그림에서 알 수 있듯이 전열면의 후면에는 폭 1 mm, 깊이 19 mm의 홈(slit)을 가공하여 전열면 내부의 열전도가 일차원적으로 될 수 있도록 배려하였다. 그림에서 알 수 있듯이 전열면에는 길이방향으로 9개의 열전대를 표면에서부터 약 2 mm의 위치에 설치하여 전열면의 온도이력을 측정하였다. 열전대는 상술한 홈들로 둘러싸인 영역의 중심부(각 블록의 중심부)에 설치하였으며 측정된 각 위치의 온도이력을 일차원 열전도 역산법(inverse

method)에 적용하여 전열면 표면에서의 온도, 열유속, 열전달률을 계산하였다⁽¹²⁾. 상술한 바와 같이 전열면은 수평방향으로의 열전달을 방지하기 위해 깊이 19 mm, 폭 1 mm의 홈을 수직으로 가공하였으나 Fig. 2에 나타난 바와 같이 두께 $t=1$ mm의 스테인레스강에 의해 블록이 상호 연결되어 있는 상태이다. 따라서 이 영역에 있어서는 각 블록 상호간 열전달이 가능하며 이로 인해 측정오차가 발생할 수도 있다. 본 연구에서는 열전도 역산법을 이용한 표면 열유속의 계산과정에서 이러한 전열면의 구조적인 문제로 인해 발생할 수 있는 측정오차를 검토하였으며, 그 결과 본 실험에 있어서 추정되는 측정오차는 약 $\pm 5\%$ 이내인 것을 알 수 있었다⁽¹¹⁾.

액막류의 두께 l_f 는 전열면의 전면에 설치되어 있는 노즐의 높이를 변화시켜 3~10 mm이내에서 조절이 가능하도록 하였다. 액막류의 두께는 주로 3, 5, 10 mm의 3종류를 대상으로 실험을 수행하였으나 본 실험범위에서 측정값에 대한 액막류 두께의 영향은 매우 적은 것으로 나타났으며, 본 연구에서는 주로 액막류의 두께가 5mm인 경우의 측정값에 대해 고찰하였다. 액막류의 온도 T_f 은 약 50~90 °C, 액막의 평균유속 U 는 약 0.2~1.0 m/sec의 범위에서 실험을 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

본 실험조건에서는 등가직경 D^* 를 대표 길이로 사용한 Reynolds수 ($Re=U \cdot D^*/\nu$)가 약 $10^4 \sim 5 \times 10^4$ 의 범위이므로 액막류는 난류상태라고 판단된다. Fig. 3에는 액막류의 두께 $l_f=5$ mm, 액막류의 과냉도 $\Delta T_{sub}=18$ K, 속도 $U=0.55$ m/sec일 경우에 대한 표면열유속 q_w 를 전열면 선단에서부터의 거리 x 를 파라미터로 하여 나타내었다. 또한 그림에는 각각의 위치조건에 대해 표면열유속이 최소로 되는 점을 병기하여 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 표면 열유속은 x 가 증가할수록 점차 감소하고 있으며 열유속의 표면온도에 대한 영향은 매우 약한 것으로 나타나고 있다.

MHF점 과열온도는 본 실험조건인 경우 약 600°C 정도의 고온에서 나타나고 있음을 알 수 있으나, 전열면 선단에서부터의 거리 x 에 대해서는 거의 영향을 받지 않고 있음을 알 수 있다.

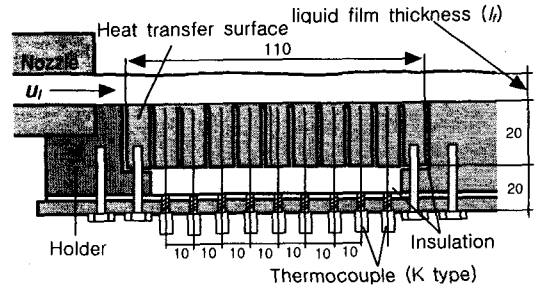


Fig. 2 Schematic of experimental apparatus

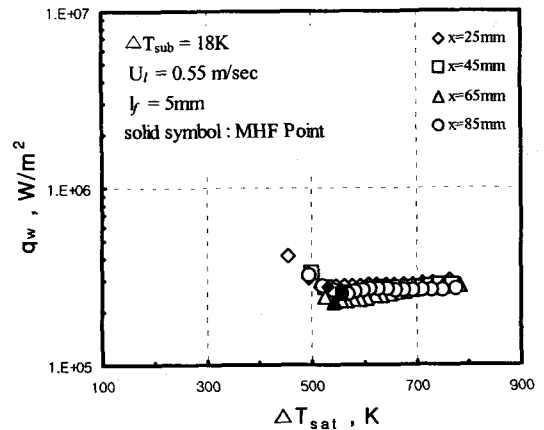


Fig. 3 Heat flux of liquid film flow

MHF점 과열온도는 본 실험조건인 경우 약 600°C 정도의 고온에서 나타나고 있음을 알 수 있으나, 전열면 선단에서부터의 거리 x 에 대해서는 거의 영향을 받지 않고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 경향은 MHF점 과열온도 ΔT_{MHF} 와 전열면 선단에서부터의 거리 x 와의 관계를 액막류의 과냉도 ΔT_{sub} 를 파라미터로 하여 나타낸 Fig. 4에서 더욱 명확히 알 수 있다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 전열면 선단에서부터의 거리 x 가 증가함에 따라 액막류의 온도가 약간 상승하는 효과로 인해 MHF점 과열온도는 약간 낮아지는 경향을 보이고는 있으나, 앞서 언급한 바와 같이 MHF점 과열온도는 x 의 영향은 매우 적게 받아 x 의 증가에도 불구하고 거의 변화하지 않고 있음을 알 수

있다. 그러나 MHF점 과열온도에 대한 액막류의 과냉도의 영향은 매우 크게 나타나고 있으며 동일한 유동속도에서도 과냉도가 클수록 MHF점 온도는 급격히 고온화되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5에는 MHF점 과열온도 ΔT_{MHF} 와 액체의 과냉도 ΔT_{sub} 와의 관계를 액막의 속도 U 를 파라미터로 하여 나타내었다. 앞서 언급한 바와 같이 MHF점 과열온도는 액막의 과냉도가 증가할수록 급격히 고온화되는 경향이 있으며, 액막류의 속도가 증가할수록 MHF점 과열온도는 약간 증가하고 있으나 액막류의 과냉도보다는 영향을 비교적 적게 받고 있음을 알 수 있다. Nishio et al.⁽⁸⁾는 과냉액체를 대상으로 수행한 풀비등 실험결과로부터 MHF점 온도에 대한 다음의 관계식을 얻었으며 그림에는 실선으로 나타내었다.

$$T_{MHF} = 204 + 8.38 \cdot \Delta T_{sub} \quad (1)$$

일반적으로 고온의 전열면에서 고체-액체간 안정적으로 형성되는 증기막은 물체의 표면이 점차 냉각됨에 따라 붕괴되기 시작하며, 이때 증기막의 붕괴양상이 MHF점 온도에 큰 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다. Nishio et al.⁽⁸⁾은 증기막의 붕괴양상을 전열면 전체에서 비교적 짧은 시간에 증기막이 붕괴되는 형태인 거시적 붕괴(coherent collapse)와 일단 특정부위에서 증기막이 붕괴되어 증기막의 붕괴가 비교적 느린 속도로 전파되어 결국에는 전열면 전 영역에서 증기막이 붕괴되는 형태인 전파적 붕괴(propagative collapse)로 구분하고, 각각의 조건에 대한 풀비등 실험을 수행하였다. 그 결과, 전파적 붕괴형태에 있어서 MHF점은 액체의 과냉도의 영향을 크게 받는 것으로 나타났지만, 증기막의 전파적 붕괴를 방지할 수 있는 실험에 있어서는 액체의 과냉도가 MHF점 온도에 미치는 영향이 비교적 적은 것으로 보고하였다. 그림에 나타낸 Nishio et al.의 관계식은 전파적 붕괴형태를 대상으로 수행한 실험결과이다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 본 실험결과는 Nishio et al.의 실험결과보다 매우 높게 나타나고 있으나, 그 경향은 매우 유사함을 알 수 있다. 본 실험결과에 있어서 MHF점 온도가 Nishio et al.의 연구결과보다 높게 나타나는 것은 주로 액체의 유동조건, 전열면의 형상 등에 기인하는 것으로 추측되지만, 본 연구에 있어서 액체의 유

동속도의 범위가 매우 적고 측정값이 이들 현상을 잘 설명할 정도로 충분하지 않아 명확한 결론을 내릴 수는 없는 상황이며 이러한 부분에 대해서는 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

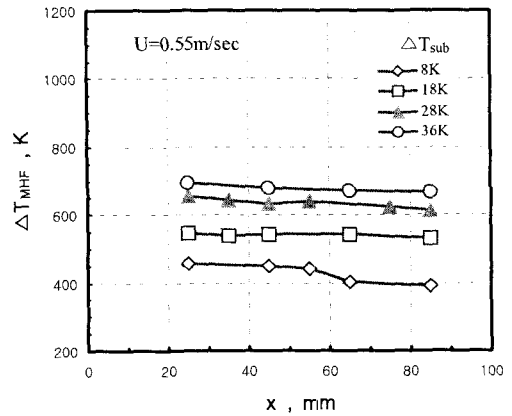


Fig. 4 Minimum heat flux point temperature

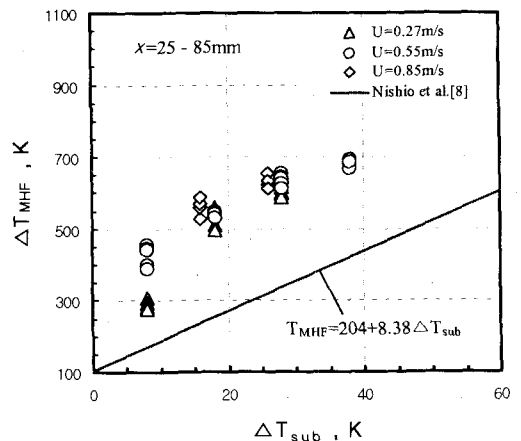


Fig. 5 Minimum heat flux point temperature

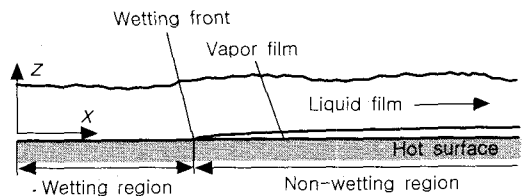


Fig. 6 Propagation behavior of wetting front

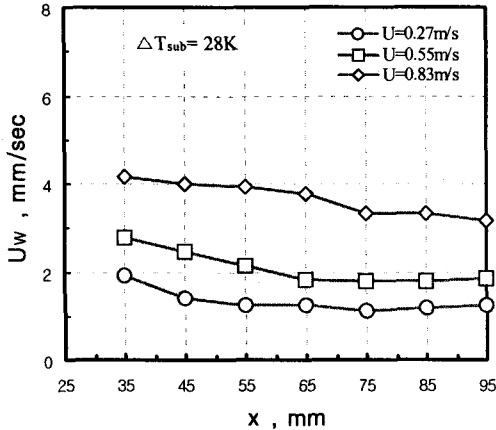


Fig. 7 Propagation velocity of wetting front

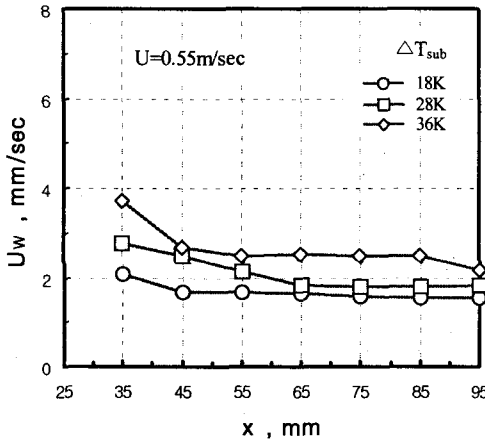


Fig. 8 Propagation velocity of wetting front

Fig. 6에는 본 연구에서의 실험과정을 카메라 촬영을 통한 관찰결과에 기초하여 개략적으로 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 액막류에 의한 냉각이 진행됨에 따라 전열면 선단에서 최초로 증기막 붕괴로 인한 고체-액체의 부착(wetting)이 발생하였으며 부착영역(wetting region)은 시간이 경과함에 따라 x방향으로 비교적 느린 속도로 전파되고 있음을 알 수 있었다. 실험이 진행되는 동안에 증기막이 붕괴되어 고체-액체가 직접 접촉하는 영역(wetting region)과 증기막이 아직도 형성되어 있는 영역(non-wetting region)의 구분이 육안으로도 확인할 수 있을 정도로 선명히 나타나고 있었다. 또한 관찰결과로

부터 임의의 위치에서 증기막이 붕괴되는 시점과 비등곡선에 있어서 MHF점이 거의 일치하고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 7, 8에는 이러한 증기막의 붕괴가 x방향으로 전파되어 나가는 전파속도(wetting velocity)를 측정하여 액막류의 속도 및 과냉도를 파라미터로 하여 각각 나타내었다. 그림에서 전파속도 U_w 는 아래의 식을 이용하여 계산하였다.

$$U_w = (x - 25) / \Delta t \quad (2)$$

여기서 $\Delta t = t_x - t_{x=25}$ 이며, t_x : 냉각개시 후, x 위치에서 증기막이 붕괴되는 시점(또는 MHF점에 도달하는 시점), $t_{x=25}$: $x=25$ mm의 위치에서 증기막이 붕괴되는 시점(또는 MHF점에 도달하는 시점)을 각각 나타낸다.

Fig. 8, 9에 나타난 바와 같이 액막류의 속도 및 과냉도가 증가할수록 증기막 붕괴의 전파속도가 점차 증대하고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 Peng et al.⁽¹³⁾의 연구결과와도 일치하고 있다. Peng et al.은 매우 얇은 액막류의 wetting 메카니즘에 대해 이론적 연구를 수행하였으며 wetting의 전파속도는 액막류의 유속과 표면 열전달에 크게 영향을 받는 것으로 보고하였다. 그러나 본 실험에서와 같이 액막류의 두께가 증기막을 완전히 덮을 정도로 충분히 두꺼울 경우에 대한 wetting 메카니즘은 여전히 불명확한 상태로 남아 있는 상황이다. 또한 증기막 붕괴의 전파속도는 전열면 선단에서부터의 거리 x가 증가할수록 약간 감소하고는 있으나 그 영향은 비교적 적게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 액막류의 평균온도가 x방향으로 진행됨에 따라 약간 상승함으로써 전파속도에 미세하나마 영향을 미치는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 두께가 약 5mm 전후의 액막류에 대한 막비등 열전달실험을 수행하여 주로 MHF점에 대하여 고찰하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 액막류의 MHF점 과열온도는 액막류의 속도, 과냉도의 영향을 크게 받아 이 값들이 증가할수록 MHF점 온도는 고온화되고 있다.

(2) 액막류의 MHF점 과열온도는 전열면 선단에서부터의 거리 x 가 증가할수록 약간 낮아지는 경향이 있으나 그 영향은 매우 미미한 것으로 나타났다.

(3) 증기막이 붕괴되는 전파속도는 액막류의 속도, 과냉도에 크게 영향을 받아 이 값들이 증가할수록 전파속도도 증가하고 있음을 알 수 있었다. 그러나 본 연구에서는 액막류의 속도, 과냉도 등이 MHF점 온도에 미치는 영향을 물리적 모델을 이용하여 좀더 명확하고 이론적으로 설명할 수 있는 단계까지는 이르지 못하였으며 이러한 부분에 대해서는 지속적인 연구가 필요하다고 판단된다.

참고문헌

- (1) Berenson, P. J., 1961, Film Boiling Heat Transfer from a Horizontal Surface, ASME J. of Heat Transfer, Vol. 83, pp 351-362
- (2) Berenson, P. J., 1962, Experiment on Pool Boiling Heat Transfer, Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 5, pp. 985-999
- (3) Spiegler, P., Hopfenfeld, J., Siberberg, M., Bumpus, C. F., Norman, Jr. and A., 1963, Onset of Stable Film Boiling and the Form Limit, Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 6, pp. 987-994
- (4) Segev, A. and Bankoff, S. G., 1980, The Role of Adsorption in Determining the Minimum Film Boiling Temperature, J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 23, pp. 637-642
- (5) Baumeister, K. J. and Simon, F. F., 1973, Lidenfrost Temperature-Its Correlation for Liquid Metals, Cryogenics, Hydrocarbons, and Water, ASME J. Heat Transfer, Vol. 95-2, 3, pp. 166-173
- (6) Bergles, A. E. and Tompson, W. G. JR., 1970, The Relationship of Quench Data to Steady-State Pool Boiling Data, Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 13, pp. 55-68
- (7) Nishio, S., 1987, Prediction Technique for Minimum Heat Flux Point Condition of Saturated Pool Boiling, Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 30, pp. 2045-2057
- (8) Nishio, S., Uemura, M. and Sakaguchi, K., 1987, Film Boiling and Minimum Heat Flux Point Condition in Subcooled Pool Boiling, JSME International Journal, Vol. 30-266, pp. 1274-1281
- (9) Kim, Y. C., Nishio, S. and Ohkubo, H., 1994, Spray Cooling with Formation of Liquid Film (Distribution of Heat Transfer Coefficient in High Temperature Region), Trans. JSME (B), Vol.60-574, pp. 2158-2164
- (10) Kim, Y. C., Nishio, S. and Ohkubo, H., 1996, Spray Cooling with Formation of Liquid Film (Film-Boiling Heat Transfer of Liquid Film Flow), Trans. JSME (B), Vol.62-594, pp. 734-739
- (11) 김영찬·유갑중·서태원, 2000, 분무냉각에 의한 강관 열처리과정에 있어서 열전달분포의 측정, 설비공학논문집, vol.12-10, pp. 886-893
- (12) Beck, J. V., 1970, Nonlinear Estimation Applied to the Nonlinear Inverse Heat Conduction Problem, Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 13, pp. 703-716
- (13) Peng, X. F., Peterson, G. P. and Wang, B. X., 1992, On the Wetting Mechanism of Liquid Flow on Hot Surface, Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 35, pp. 1615-1624